

A védőgáz és a volfrámelektrod-csúcskialakítás hatása az ausztenites acélok varratgeometriájára

*Vágvölgyi Gábor^(a), Dobránszky János^(b),
Gyura László^(c), Reichardt László^(c)*

^(a) *Kasamas Hungária Hegesztéstechnológiai Kft., 7100 Szekszárd, Páskum u. 2.*

^(b) *MTA–BME Fémtechnológiai Kutatócsoport, 1111 Budapest, Goldmann tér 3.*

^(c) *Linde Gáz Magyarország Rt., 1097 Budapest, Illatos út 9-11.*

Összegzés

A dolgozatban a szerzők bemutatják azokat az eredményeket, amelyeket a semleges gázos volfrámelektrodos hegesztésnél a varratlakot befolyásoló két paraméter hatásának vizsgálatára elvégzett kísérletekkel nyertek. Az egyik paraméter a védőgáz összetétele volt. Vizsgálták a tiszta argon mellett a különféle hidrogéntartalmú és héliumtartalmú gázok szerepét. 2%, 5%, 6,5% hidrogént, ill. 50% héliumot tartalmazó gázkeveréket használtak védőgázként a tiszta argon mellett. Megállapították, hogy mind a hidrogén, mind a hélium jelentősen növeli a varrat beolvadását. Ennek köszönhetően a gázkeverék alkalmazása egy alkalmas módszert teremt az egyoldali, teljes átolvadású varratok elkészítésére a két oldalról nem hozzáférhető szerkezeti elemek hegesztésekor. A hélium ugyanakkor a varratszélességét is növeli. A hidrogén erőteljesebben hat a varrat mélységének növekedésére, és ezt a hatást már 2 térfogat-% mennyiségben is erőteljesen kifejti. A másik vizsgált paraméter a volfrámelektrod csúcshöge volt, konkrétan 15°, 22,5°, 30°, 45°, 90° és 180°. Az elektrod anyaga WL15 típusú (arany színjelölésű), lantan-oxid-dal ötvözött 2,4 mm átmérőjű volfrám volt. A jelen kísérletsorozatban a csúcsköszörülésnél tompítást nem alkalmaztak. A kísérleti hegesztéseket AISI 304L anyagminőségű ausztenites acélra készített hernyóvarratok hegesztése formájában végezték. A varratgeometriát metallográfiai csiszolatokról készített digitális fotók grafikus kiértékelésével vizsgálták, amelynek keretében megmérték a varratszélességet, a varrat beolvadási mélységét és a varratkeresztmetszetet. A két említett paraméter együttes hatását vizsgálták.

Summary

In the paper the authors present the results, which were obtained by the investigations of two parameters, which influence the weld penetration at the TIG welding. The first parameter was the chemical composition of shielding gas. Pure argon and gas mixtures containing hydrogen and helium were examined. Results show that the hydrogen affects significantly the depth of penetration however the helium affects the width of weld too. The second investigated parameter was the angle/taper of the grounded tungsten electrode, namely 15°, 22,5°, 30°, 45°, 90° and 180°. WL15 type tungsten electrode was alloyed with lanthanum-oxide, the diameter of the electrode was 2.4 mm without tip flat, and the base material was AISI 304L type austenitic stainless steel plate. With using image analyzer the width, depth and weld metal cross-section on etched metallographic specimens characterized shapes of welds.

1. Bevezetés

A mérnöki gyakorlatban egyre többször találkozhatunk ausztenites szerkezetű acél alapanyagokkal. Az első ausztenites acél a XX. század elejére tehető bevezetését követően a felhasználás töretlenül növekszik, a világtermelés 2003-ban elérte az évi 20 millió tonnát a 900 millió tonnás acéltermelésen belül. A 2003. évi mintegy 950 ezer tonnás hazai acélfelhasználáson belül a korrózióálló acélok részaránya megközelítette az 1%-ot.

Különösen fontos a rozsdamentes acélok feldolgozása terén a semleges védőgázos volfrámelektrodos ívhegesztés[®], és e technológián belül a hegesztés védőgázait, a volfrámelektrod sajátosságait érintő terület. Csak a nagyobb, tradicionálisan ausztenites acélok feldolgozásával foglalkozó cégeknél fordul elő, hogy védőgázként az Ar mellett más gázt vagy gázkeveréket használnak. Sok esetben még gyökvédelemhez sem választanak mást. Ennek fő oka az lehet, hogy nem léteznek olyan közkezen forgó hegesztési kézikönyvek vagy tankönyvek, melyek más védőgázra is kidolgozott hegesztési paramétertáblát mutatnának be. Jellemző továbbá, hogy a gázkeverékek nagyobb a vetélytárs argonénál. Kell tehát a hegesztőmérnök részéről némi kísérletező kedv, és üzemgazdasági véna, hogy más védőgázokat is számításba vegyen.

Hasonló a helyzet a volfrámelektrod típusa, ill. annak csúcsgeometriája vonatkozásában. Az itt fellelhető információk is igen szűkösek, és jórészt csak idegen nyelvű szakirodalomból szerezhetők be. Így a megérzésen és a szakmában terjedő vélelmeken kívül nem áll rendelkezésre más adat a helyes elektrod kiválasztásához. Sokszor a választás inkább épül a megszokásra, mint a körülmények tudatos mérlegelésére. Ez a dolgot a két említett paraméter hatását vizsgálja, s igyekszik a hétköznapi gyakorlat eredményéhez érdemben is hozzájárulni.

2. Az ausztenites acélok semleges gázos W-elektrodos ívhegesztése

Az 1936-ban felfedezett argon védőgázos volfrámelektrodos ívhegesztés (elterjedt rövidítései: AWI, AVI, TIG, GTAW, WIG) a II. világháborút követően terjedt el, és ma már gyűjtőfogalomként magába foglalja a más semleges védőgáz-atmoszférák alatt történő hegesztést is [1]. Az ív begyújtását – a kicsit is igényes felhasználók kizárólag – nagyfrekvenciás ívgyújtó berendezésre bizzuk [2]. Ez a szerkezet a hegesztési áramkörrel párhuzamosan kötve gyorsan változó nagyfeszültséggel terheli meg az elektrodot. Az itt ébredő 2–5 kV elegendő ahhoz, hogy (védőgáztól függően) akár 50 mm távolságból is villamos ívkisülést idézzon elő. A kisülés ionizáló hatása nyitja meg az utat az áramkörre kapcsolt hegesztőáram előtt [3].

Az SGW-hegesztés a vele általában versenyző kézi bevonatelektrodos vagy fogyóelektrodos védőgázos eljárásokhoz képest lassú és drága. Ennek okát hőforrásának koncentráltságában, a hozzá használt védőgázok árában és a képzett hegesztő rezsióradíjában kereshetjük. Azt, hogy mégis versenyképes, a varratok minőségének, a kötések minimális utánmunkálási igényének és főleg a széles lemezvastagság-, ill. anyagtartománynak köszönheti. Az ausztenites korrózióálló acélok SGW-hegesztésének sajátos problémái a következők [4–8]:

[®] Magyarországon az angol nyelvű szakirodalomban „TIG-welding” elnevezésű eljárást „AWI-hegesztés” néven említik a tankönyvek is, ám ezt az elnevezést – amellet, hogy a rövidítés illogikus és nyelvtanilag is problémás – idejétmúlttnak kell minősíteni, mivel csak az argont jelöli meg védőgázként. Éppen ezért fontos lenne, hogy a hazai szakmai közvélemény elfogadjon egy korszerű, szakmailag és nyelvtanilag is korrekt elnevezést és rövidítést, amely az angol megnevezéssel azonos logikai alapon áll, de a lényegét mégis magyarul fejezi ki. Javaslatunk a következő: **semleges gázos W-elektrodos ívhegesztés** (írásban másként: semleges gázos volfrámelektrodos), ill. rövidítve: SGW-hegesztés.

- A kevésbé koncentrált hőbevitelnek, az ausztenites acél rossz hővezető képességének és nagy hőtágulásának köszönhetően jelentős hődeformációval, maradó feszültségekkel és kristályosodási repedés veszélyével kell számolni. Ezért csökkenteni kell a hőbevitel értékét, amely több varratsort és a vékonyabb lemezeknél is leélezési igényt jelenthet. A helyzetet valamelyest javíthat az impulzusüzemű vagy a ráklépéses technológia.
- A kevésbé koncentrált hőbevitel lassabb hűlést eredményez, így nő az esélye az anyagra káros fázisok kiválásának.
- Az erősen ötvözött anyagra jellemző nagy felületi feszültség jelentősen csak a hegesztőanyag Si-tartalmával szabályozható.
- A káros felületi oxidáció és ötvözőkiégés elkerülése érdekében nem csak a korona-, hanem a gyökoldal kielégítő védelméről is gondoskodnunk kell.
- Különös gondot kell fordítani az ausztenites acél feldolgozása során az anyaggal érintkezésbe kerülő szerszámok, szállító és tárolóeszközök minőségére, anyagára. Nem használhatók azok a szerszámok, melyekkel ferrites anyagot munkáltak meg (pl. drótkefe, vágókorong stb.). Lehetőség szerint az ausztenites acélt feldolgozó műhelyrészt válasszuk el. A szállító- és tárolóeszközök ötvöztelen acél elemeit vonjuk be fával, műanyaggal vagy ausztenites acéllal. Kerüljünk minden érintkezést a kétfajta fém között.
- Az időigényesebb hegesztés növeli a hegesztési füstnek való expozíciós időt [19].

3. A volfrámelektrod anyaga

Az SGW-hegesztés esetében az ív a munkadarab és a W-elektrod között ég, amelynek feladata kettős: az áramot a hegesztés helyéig vezeti, majd kialakítása folytán koncentrálni, irányítja az ívoszlopot. Az elektrod anyaga tiszta, vagy valamely fém-oxiddal ötvözött volfrám. Tekintettel arra, hogy a volfrám előállítása szinterezés útján történik, e fémoxidok bejuttatása nem jelent különösebb gondot. A járatosabb elektrod-típusokat az 1. táblázat ismerteti.

Ötvözésre két okból van szükség: a ritkaföldfém-oxidok növelik az elektrod áram- és hőterhelhetőségét (a tiszta W olvadáspontja 3410 °C, a La-ötvöztetésű elektrodok izzási hőmérséklete megközelíti a 4200 °C-t), másrészt az oxidok csökkentik az elektronemisszióhoz szükséges kilépési munkát. Ezzel mind az ívgyújtás, mind pedig az ívstabilitás jelentősen javul. A különböző W-elektrodok természetesen különböző hegesztési tulajdonságokkal bírnak [9].

- Ötvöztelen volfrámelektrod: kis izzási hőmérsékletének köszönhetően (~3400 °C) elsődlegesen Al, Mg és ezek ötvözetei hegesztéséhez használható.
- Tórium-oxiddal ötvözött: a legjáratosabb típusok a gyengén és erősen ötvözött acélok, réz, titán és egyéb fémek egyenáramú hegesztésére. Áramterhelhetősége kb. 20%-kal nagyobb a tiszta W-nál, kopásállóbb. Izzási hőmérséklete ~ 4000 °C. A tórium radioaktív tulajdonsága miatt atomerőműi hegesztésekhez korábban sem volt alkalmazható, ma pedig már az egészségre fokozottan ártalmas volta miatt tiltólistán szerepel.
- Cirkónium-oxiddal ötvözött: főleg váltóáramú hegesztéseknél alkalmazzák, bár egyenáramú hegesztésre is használható. Könnyűfémek hegesztésekor kopásállóbb, mint az ötvöztelen változat. Nagyon jó ívgyújtó képesség jellemzi. Izzási hőmérséklete ~3800 °C.
- Cérium-oxiddal ötvözött: kis árammal végzett egyenáramú hegesztéseknél használatos.
- Lantán-oxiddal ötvözött: a tórium-oxiddal ötvözöttekhez hasonlóan kiváló hegesztési tulajdonságokkal bír, de váltóáramú hegesztésekhez is jól használható. Élettartalma igen nagy, nem radioaktív és egészségre nem ártalmas. Várhatóan a közeljövőben felváltja a ma még legelterjedtebb WT típusú elektrodákat. Izzási hőmérséklete ~4200 °C.

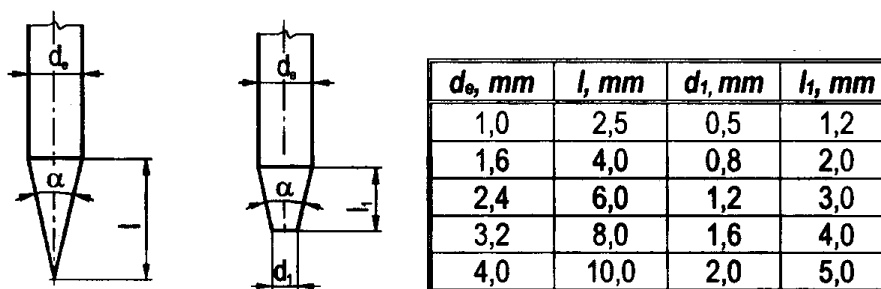
1. táblázat

A hegesztésre szolgáló volfrámelektrodok jellemző adatai

Jelölés	Oxidtípus és tömeg-%	Színjel	Áramnem	Szabvány
WP	–	zöld	AC	EN 26848
WT4	0,35–0,55 ThO ₂	sötétkék	DC	EN 26848
WT10	0,90–1,20 ThO ₂	sárga	DC	EN 26848
WT20	1,80–2,20 ThO ₂	piros	DC	EN 26848
WT30	2,80–3,20 ThO ₂	lila	DC	EN 26848
WT40	3,80–4,20 ThO ₂	narancs	DC	EN 26848
WZ3	0,15–0,50 ZrO ₂	barna	AC	EN 26848
WZ8	0,70–0,90 ZrO ₂	fehér	AC	EN 26848
WC20	1,80–2,20 CeO ₂	szürke	DC	EN 26848
WL10	0,90–1,20 LaO ₂	fekete	AC / DC	EN 26848
WL15	1,30–1,70 LaO ₂	arany	AC / DC	AWS A5.12
WL20	1,80–2,20 La ₂ O ₃	világoskék	AC / DC	ISO 6848
WS2	Oxidkeverék	türkiz	AC / DC	–
WY20	1,80–2,20 YO ₂	kék	AC / DC	ISO 6848
WX	1,00–4,00% oxidkeverék	sárgászöld	AC / DC	AWS A5.12

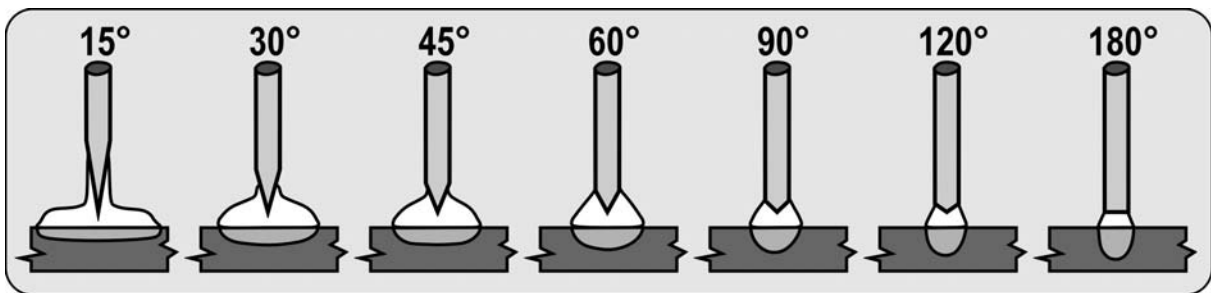
4. A volfrámelektrod csúcsgeometriája

Hangsúlyozni kell, hogy a W-elektrod csúcskialakítása erőteljesen hat az ív alakjára és ezzel a varrat szélességére, mélységére és alakjára. Egyenáramú hegesztések esetében a választott kúpszög az áramerősség függvénye (pl. a *Trafimet* cég ajánlása szerint: 5–10 A → 20°, 10–20 A → 30°, 20–100 A → 60–90°, 100–200 A → 90–120°. Az elektrod végén tompítást kell kialakítani. Ezzel megakadályozhatjuk a csúcs túlterhelését és a leolvadását követő volfrámzárvány-képződést. A tompításra nézve az 1. ábra mutat példát.



1. ábra

A W-elektrodok tompítására ajánlott geometriai jellemzők



2. ábra

A W-elektrodok csúcsszögének hatása az ívalakra és a beolvadásra mikro-TIG hegesztésnél

A csúcsszög varratgeometriára gyakorolt hatását a szakirodalom ellentmondásosan határozza meg. Míg egyes források [3] csökkenő kúpszög esetén a beolvadási mélység növekedését és a varratszélesség csökkenését prognosztizálják, mások ezzel ellenkező hatást feltételeznek, ahogyan a 2. ábra vázolja [10].

Nem részletezik azonban sem a vizsgálati eredmények meghatározásakor használt áramerősség értékeket, sem az ott felhasznált védőgázok minőségét. Erős az egyetértés azonban a W-elektrod felületi minőségét illetően: minél kisebb a köszörült (polírozott) volfrámelektrod felületi érdessége, annál nagyobb az élettartama. Hasonlóan kedvező hatású, ha köszörüléskor a megmunkálás barázdái az elektrod hossz tengelyével párhuzamosan futnak.

Az elektrod átmérőjét mindig az áramnemtől, áramerősségtől és az ötvöztől függően kell megválasztani. Bár célszerű lenne itt az alkalmazott védőgáz hatását is figyelembe venni, erre vonatkozóan gyakorlati adatok azonban nem találhatók. Túl kis volfrámelektrod-átmérő esetén az elektrod túlterhelődik, kopása felgyorsul. Az indokoltnál nagyobb átmérő használata sem célszerű, mivel az ív az kis áramterhelés miatt ide-oda mozog, táncol a volfrám hegyén, és ezzel akadályozza a jó minőségű kötés létrejöttét.

Az imbolygó ív helyi áramsűrűség-túlterhelést okozhat, ezzel növeli a kopást, és volfrámzárványok kialakulását idézi elő. Váltakozóáramú hegesztésnél a volfrámon képződő hő annak végét félgömbalakúvá formálja. Ez a félgömb a keletkező ívet erősen szórja, így váltóárammal pontos, jó minőségű hegesztett varratok nehezebben készíthetők.

5. Az SGW-ívhegesztéshez használt védőgázok

A semleges gázos W-elektrodos ívhegesztésnél a védőgáz négy fő szerepet lát el:

- Védi a volfrámelektrodát és a varrat ömledékét a környező levegő káros hatásaitól.
- Kis ionizációs potenciálja révén segíti az ívgyújtást és az ívíjragyújtást.
- Biztosítja az ív-plazma alapanyát, melynek hőtartalmával és hővezető képességével segíti az alap- és hegesztőanyag megömlését
- Gázhűtéses pisztoly esetén hűti a volfrámelektrodát és a pisztoly belső szerkezeti elemeit.

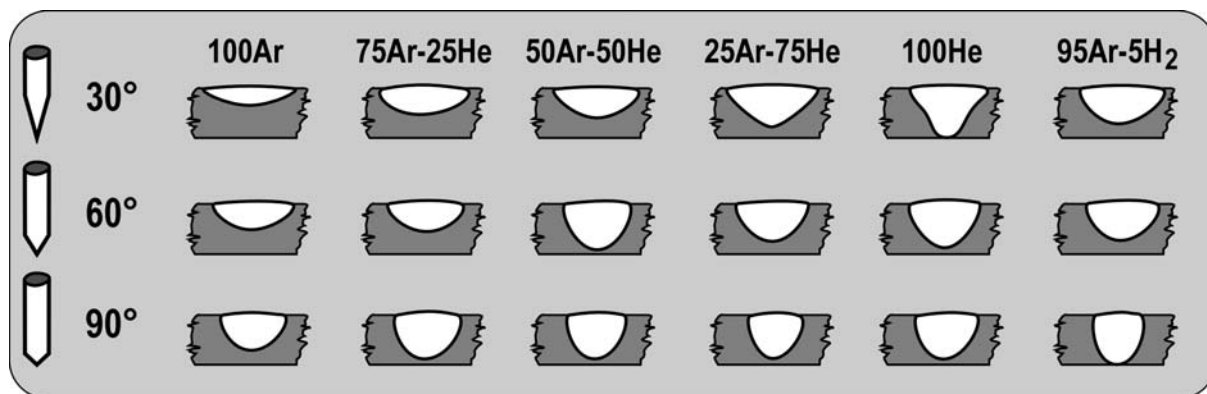
A kereskedelemben kapható gázok, ill. gázkeverékek védőgázként e négy tulajdonság figyelembevételével választhatók ki. A Linde által forgalmazott védőgázokat és gyökvédelmi célú gázokat a 2. táblázat foglalja össze. Természetesen a különböző gázok, ill. gázkeverékek más és más módon hatnak a hegesztőív és az ömledék tulajdonságaira, nevezetesen [11–18]:

2. táblázat

A Linde forgalmazta hegesztési gázok SGW-ívhegesztéshez

Megnevezés	DIN 439	Ar	O ₂	He	N ₂	H ₂
H E G E S Z T É S H E Z						
Argon	I 1	100				
Hélium	I 2			100		
Varigon S	M 13	maradék	0,03			
Varigon He 30	I 3	70		30		
Varigon He 50	I 3	50		50		
Varigon He 70	I 3	30		70		
Varigon He 30 S	M 13 (1)	maradék	0,03	30		
Varigon H 2	R 1	98				2
Varigon H 5	R 1	95				5
Varigon H 6	R 1	93,5				6,5
Varigon H 10	R 1	90				10
Varigon H 15	R 1	85				15
Varigon H 20	R 2	80				20
G Y Ö K V É D E L E M H E Z						
Nitrogén	F 1				100	
Formálógáz 95/5	F 2				95	5
Formálógáz 90/10	F 2				90	10
Formálógáz 85/15	F 2				85	15
Formálógáz 80/20	F 2				80	20

- Argon: A kereskedelemben kapható legismertebb és legjáratosabb nemesgáz. Igen kis ionizációs potenciálja (15,76 eV) révén argon atmoszférában az ív stabil és könnyen gyújtható. Hővezető képessége azonban kicsi. A levegő szakaszos lepárlásával „olcsón” előállítható. A hegesztéshez legalább a 4.6-os tisztaságú argon javasolt.
- Hélium: Meglehetősen drága, az európai gyakorlatban nem is terjedt el. Használata elsősorban a könnyűfémek hegesztéséhez kötődik. Nagy ionizációs potenciálja (24,59 eV), jó hővezető képessége nagy energiasűrűséget, erősebb beolvadást eredményez. Szintén ennek tudható be, hogy a He-atmoszféra alatt hegesztett varratok szélein jelentős oxidképződés figyelhető meg. Kis sűrűségének köszönhetően a vályú helyzetű hegesztésnél nagyobb gázáramot igényel. Ívgyújtó képessége gyenge. A hélium és a hidrogén mennyiségének hatása a varrat geometriai jellemzőire a 3. ábra mutatja be.
- Hidrogén: Redukáló gáz, az argonhoz legfeljebb 20%-ban keverik. Növeli az ívfeszültséget, a gáz hővezető képességét, és ennek megfelelően a beolvadást. Ferrit-perlites acélokban jelentősen növeli a hidrogén okozta hideg-repedés veszélyét. Az ausztenites acél jobb hidrogénoldó és alakváltozó képességének köszönhetően jól viseli a hidrogén jelenlétét. Használata során azonban ügyelni kell a δ -ferrit-tartalomra, mely lényegesen nem haladhatja meg a 10%-ot. Már kis mennyiségű oxigén jelenlétében is porozitáshoz vezet.
- Oxigén: Igen erősen oxidáló hatású aktív gáz. Használata elsősorban az indokolja, hogy már igen kis térfogat-%-ban is jelentősen csökkenti az ömledék felületi feszültségét. SGW-hegesztésnél való használata nem jellemző, hiszen jelentősen hozzájárul a 3400–4200 °C-on izzó volfrámelektrod idő előtti elhasználódásához, ám olykor – igen kis százalékban – váltóáramú hegesztések védőgázaihoz keverik.



3. ábra

A hélium és a hidrogén mennyiségének hatása a varrat geometriai jellemzőire

- Nitrogén: Alkalmazása elsősorban a gyökvédelemhez köthető. A varrat szempontjából semleges, bár az acélban való oldódása problémákra vezethet. Különösen igaz ez duplex acélok hegesztésénél, ahol az alkalmazott gáz nitrogéntartalmától erősen függ az acél δ -ferrit-tartalma, a nitrogén ugyanis erős ausztenitképző. Stabilizált ausztenites acélok esetében számolnunk kell a gyökoldal TiN okozta sárgás-arany elszíneződésével.

A magyarországi gyakorlat az SGW-hegesztés védőgázaként szinte kizárólag az argont veszi számításba. Csak a komolyabb hegesztési potenciált képviselő nagyobb cégek számolnak a gázkeverékekkel elérhető előnyös hatásokkal.

6. A kísérletek és vizsgálatok ismertetése

A kísérletek keretében két paraméternek a varratgeometriára gyakorolt hatását vizsgáltuk, nevezetesen a védőgáz-összetételt és a volfrámelektrod-csúcsszöget. Minden más hegesztési paramétert állandó értéken tartottunk. A változó paramétereket a 3. táblázat, az állandó és a vizsgálati paramétereket pedig a 4. táblázat tartalmazza:

3. táblázat

A hegesztési kísérletek változó paramétereinek értékei

Védőgáz-összetétel	Volfrámelektrod-csúcsszög
Argon	15°
Argon + 2,0% H ₂	22,5 °
Argon + 5,0% H ₂	30 °
Argon + 6,5% H ₂	45 °
Argon + 10 % H ₂	90 °
Argon + 50 % He	180 °
Hélium	félgömb

A beolvadási mélységet és a szélességet a próbadarabokból készített makrocsiszolatok mikroszkópos vizsgálatával határoztuk meg. A fúziós vonalat a mélység és szélesség meghatározásakor a megömlött területhez soroltuk.

4. táblázat

A hegesztési kísérletek állandó és vizsgálati paraméterei

Állandó paraméterek	Vizsgálati paraméterek
Alapanyag minősége, mérete és kezdeti hőmérséklete	Ívfeszültség
Hegesztési áramerősség	Beolvadási mélység
Hegesztési sebesség	Megömlesztett terület
Védőgázhozam	Beolvadási szélesség
A volfrámelektrod átmérője és anyagminősége	Teljes geometriai tényező
Volfrámcsúcs távolsága az alapanyagtól	
Volfrámcsúcs kinyúlása a gázterelő kerámiából	
A tompítás mértéke (nem volt tompítás)	
Gázterelő kerámia kiömlő keresztmetszete	
A pisztoly döntési szöge (hegesztési iránnyal ellentétes)	

Tekintettel arra, hogy a volfrám csúcsgeometriájának hatását a szakirodalom különböző módon ítéli meg, és feltételezésünk szerint ennek oka az adatok felvételekor alkalmazott különböző áramerősségekben kereshető, ezért az alapkísérletek során az argon védőgázzal végzett kísérletsorozatot az alapáramnál (80 A) lényegesen nagyobb (250 A) és lényegesen kisebb (26 A) áramerősségeken is elvégeztük.

Természetesen itt az eredetileg alkalmazott állandó paramétereket is a megváltozott áramerősség értékekhez igazítottuk, hiszen vizsgálható minőségű beolvadásra volt szükség. E sorozatok célja nem az, hogy a belőlük nyert adatokat az alapkísérlet eredményeivel közvetlen vessük össze. Jó képet adnak azonban arról, hogy a csúcshőgát varratgeometriára gyakorolt hatása kis- és nagy áramerősségen ugyanolyan jelleget mutat-e.

Az alapkísérlethez használt 3 mm-es, ill. a kiegészítő kísérletekhez használt 2 mm és 8 mm-es anyagvastagsághoz tartozó hegesztési paramétereket előkísérletekkel állapítottuk meg. A megfelelő értékek kiválasztásánál arra törekedtünk, hogy a sorozatok során az átrokadás nélkül elérhető legmélyebb beolvadást alakuljon ki.

A kísérleteket a Linde Gáz Magyarország Rt. budapesti kísérleti laborjában végeztük. Áramforrásként Esab Aristotig LUC 500-as inveteres berendezés szolgált, míg az előtolás egyenletességét egy szekátor biztosította. A volfrámelektrodák szög pontos köszörüléséhez a BME ATT biztosította a fokozatmentesen állítható volfrámköszörűt. A munkadarab befogása egy egyedi építésű szorítókészülékkel lett megoldva. Az ívfeszültség mérése a HF gyújtójel elvételét követően multiméterrel történt.

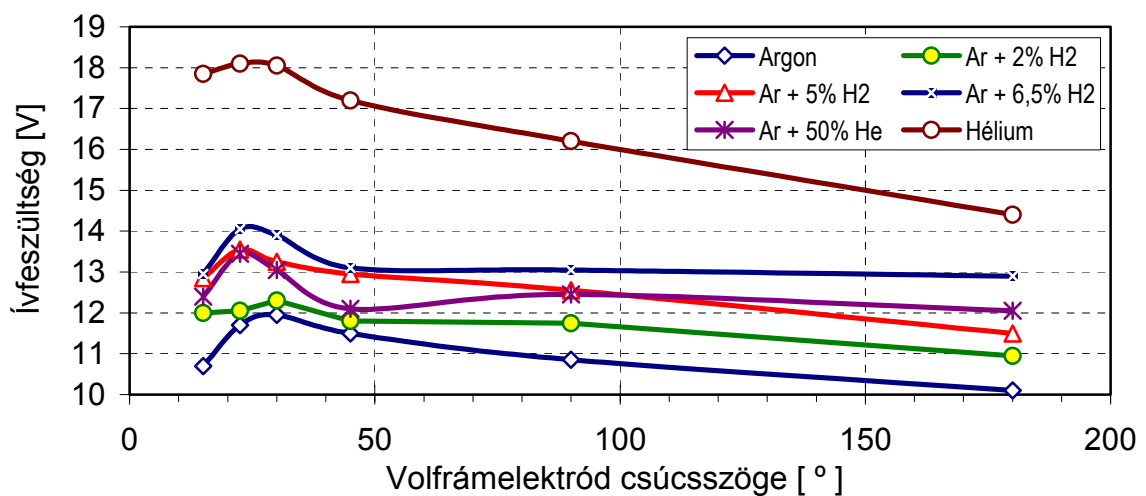
A metallográfiai vizsgálatok a BME ATT metallográfiai laboratóriumában történtek. A darabolás plazmavágóval, fűrész tárcsával, lemezvágó ollóval és vágókoronggal történt. A plazmavágott felületből 3 mm-t marógépen lemunkáltunk, majd a 8 mm-nél vékonyabb lemezek műgyantába lettek öntve. A próbatestek csiszolása, polírozása után a csiszolatokat réz-klorid, sósav és alkohol elegyében marattuk, majd minden darab mikroszkópi képéről digitális fényképet készítettünk. Ezeket a képeket később számítógépen dolgoztuk fel.

7. A kísérletek eredményeinek értékelése

7.1. Az ívfeszültség

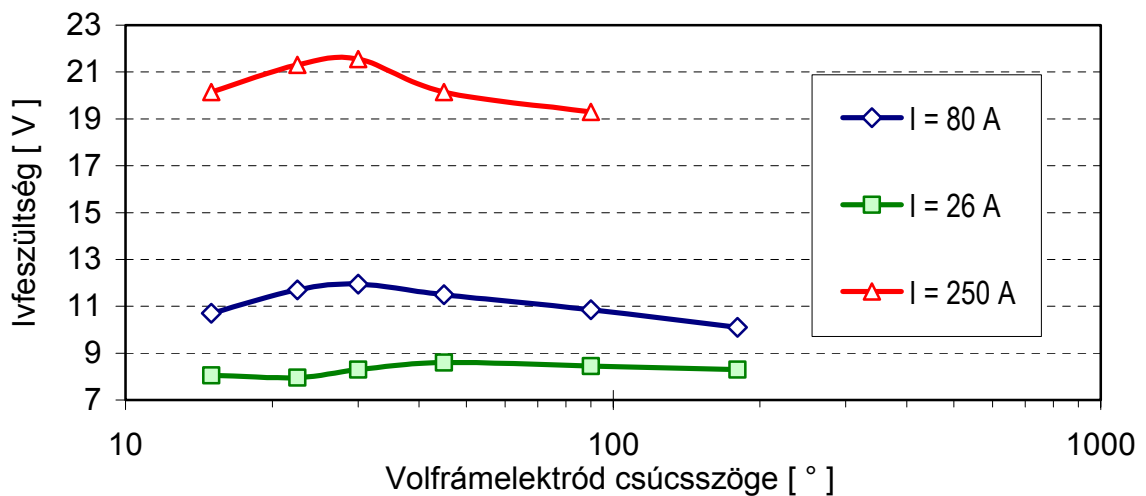
A 4. ábra szerint a W-elektrod csúpszöge függvényében az ívfeszültség egy felső határértékkal jellemzett görbét ír le. 80 A áramerősség mellett ez a maximum $22,5^\circ$ és 30° között található. Ezen az alkalmazott védőgáz összetétele csak keveset befolyásol. Értelemszerűen a hélium, ill. a hidrogén megjelenése a gázkeverékben szintén növeli az ívfeszültséget. Ez első sorban az argonhoz kevert gázkomponensek nagyobb ionizációs potenciáljával, és ennek megfelelően az ívoszlop kisebb ionhányadával magyarázható.

Hasonló jellegű feszültségfutamok figyelhetők meg eltérő áramerősségek mellett is, de kisebb áramerősségeknél a görbék jobbra és le, nagyobb áramerősségek esetében kissé balra és felfelé tolódnak. Jól szemlélteti ezt a logaritmikus x tengellyel felvett 5. ábra is.



4. ábra

Az elektródcúcsszög és a védőgázok ívfeszültségre gyakorolt hatása

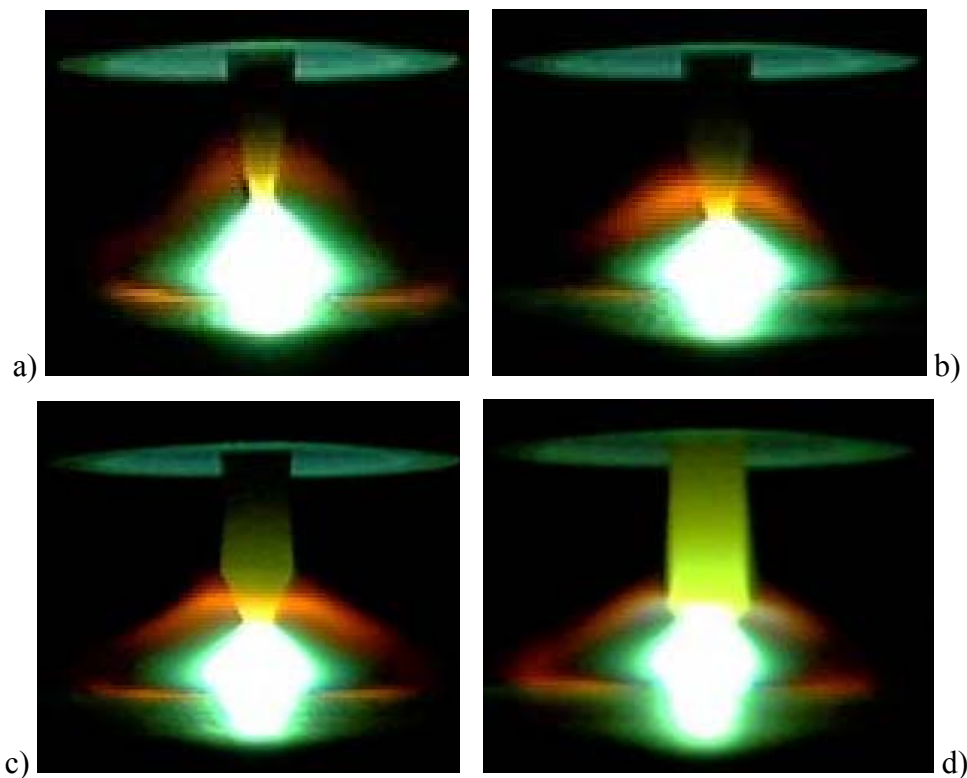


5. ábra

A csúcsszög és az áramerősség hatása az ívfeszültségre (védőgáz: argon)

Érthető az a tendencia, mely szerint a kúpszög csökkentése az ívfeszültség növekedéséhez vezet, minthogy adott áramerősség eléréséhez a katód egy meghatározott területű emittáló felületére van szükség. A szög csökkenésével e felület elemei a munkadarabtól távolodnak. Ez az ívhossz „kvázi” növekedését okozza. A megnövekedett ívhossz pedig ebben az áramerősség-tartományban nagyobb ívfeszültséget igényel. Egységnyi áramerősség esetén az α kúpszögű és A felületű volfrámelektrodnak az ív által érintett H magasságát („aktív katódméret”) az (1) összefüggés fejezi ki. A mért értékeket pedig a 6. ábrán látható ívképekből határoztuk meg, és a 7. ábrán összesítettük.

$$H = \sqrt{\frac{A}{\pi \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left(\left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^{-1} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)}} \quad (1)$$

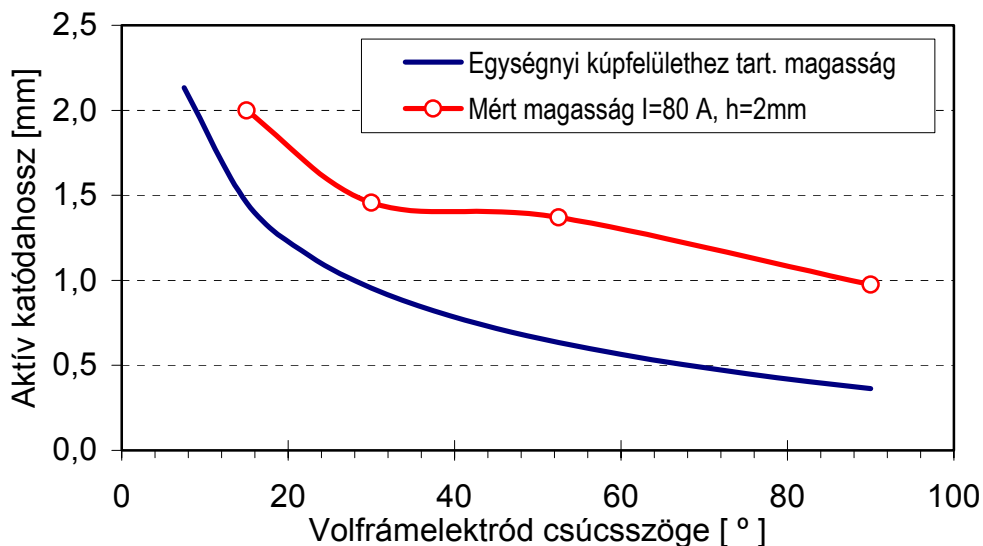


6. ábra

Ívalakok argon védőgázban: 22,5° (a), 30° (b), 45° (c), 90° (d).

Áramerősség: $I=80$ A, W-elektrod-csúcs-távolság: $h=2$ mm, W-elektrod-átmérő: $d=2,4$ mm.

A feszültség visszaesése a kisebb hővezető keresztmetszetre és az ív által érintett kúpfelület alkotóra merőleges irányú görbületének csökkenésére vezethető vissza. Nagyobb hőmérsékleten részben a termikus gerjesztés veszi át az elektromos térerő szerepét. A volfrámelektrod egyre nagyobb hőtágulása következtében az emittáló felületek közelebb tolódnak a munkadarabhoz – ezzel csökken az ívhossz. A görbület csökkenésével pedig nő a töltéshordozók felületi sűrűsége, és ezzel lokálisan a villamos térerő is. Így adott elektronáram fenntartására kisebb hegesztési feszültség is elegendő.



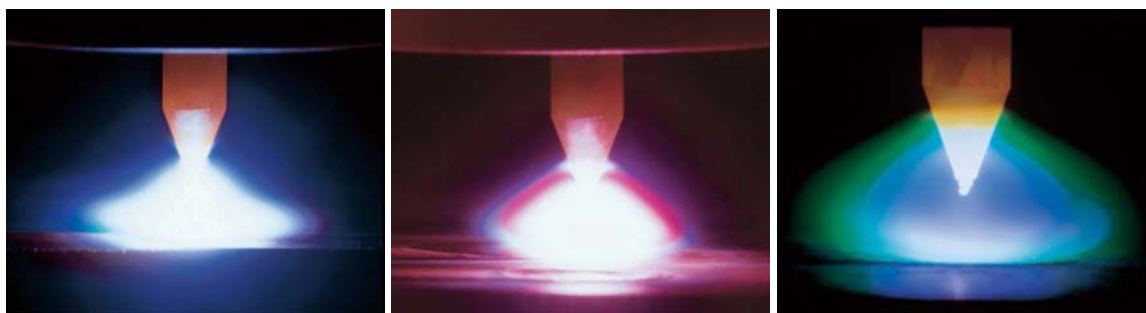
7. ábra

Egységnyi kúpfelülethez tartozó aktív katódméret a kúpszög függvényében

Ezt a teóriát támasztja alá az a megfigyelés is, hogy miért tolódnak a görbék kisebb áramerősségnél jobbra. Itt ugyanis az alkalmazott volfrámelektrod átmérője is lényegesen kisebb volt. A fent leírt jelenségre épül a 750 kV-os nagyfeszültségű vezetékek teljesítményvesztésének kötegeléssel történő csökkentése.

7.2. A beolvadási szélesség

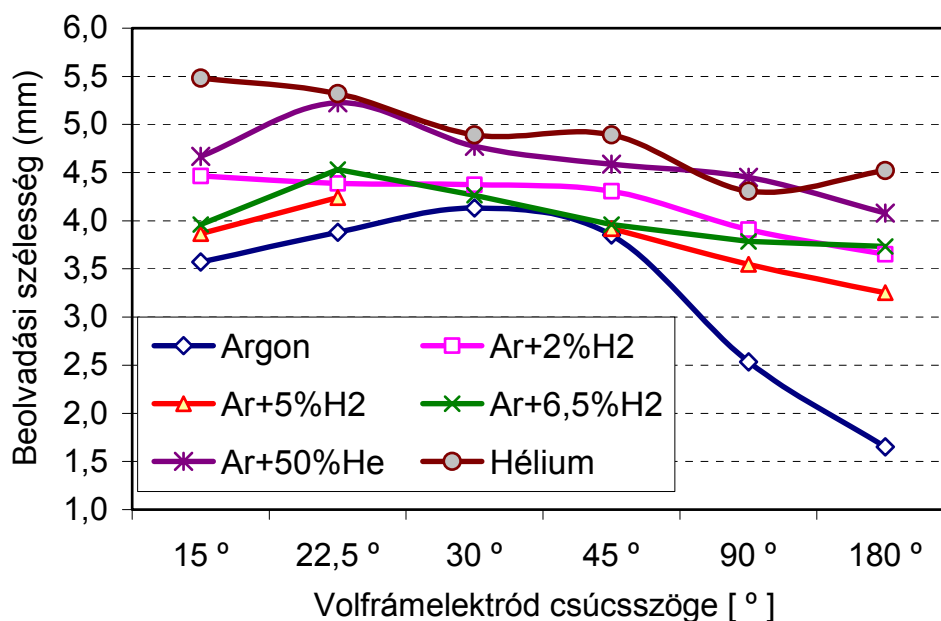
Az ívfeszültség és a varratszélesség között szoros összefüggés áll fenn. Növekvő ívfeszültség mellett a katódból kilépő elektronok csak nagyobb távolságot megtéve érik el az anódot (munkadarab). Ez a nagyobb távolság növeli annak az esélyét, hogy a negatív töltésű részecskék még ionizálatlan gázzal találkozzanak. Az ívoszlopban fellépő ütközések az oszlop harangformájú szóródását okozzák. Az így kialakuló nagy átmérőjű ívtalppont pedig széles sávban olvasztja meg a munkadarab felületét (lásd 8. ábra). Mivel az argonhoz kevert gázkomponensek nagy ionizációs potenciáljuk révén szintén emelik az ívoszlop ionizálatlan atomhányadát, ezért önmagukban is jelentősen hozzájárulnak mind az ívoszlop szélesítéséhez, mind pedig az ív ellenállásának és ezzel feszültségének növeléséhez (8. ábra).



8. ábra

A védőgáz hatása az ívoszlop geometriájára (sorrendben: Ar, Ar+2% H₂, He)

A várt eredménytől lényegesen egyedül az argon védőgáz alatt hegesztett darabjai térnek el. Ennek az ismételten hegesztési kísérlet során használt 6 mm-es lemezek vetemedése volt az oka. A mért feszültségértékek is jobban ingadoztak.



9. ábra

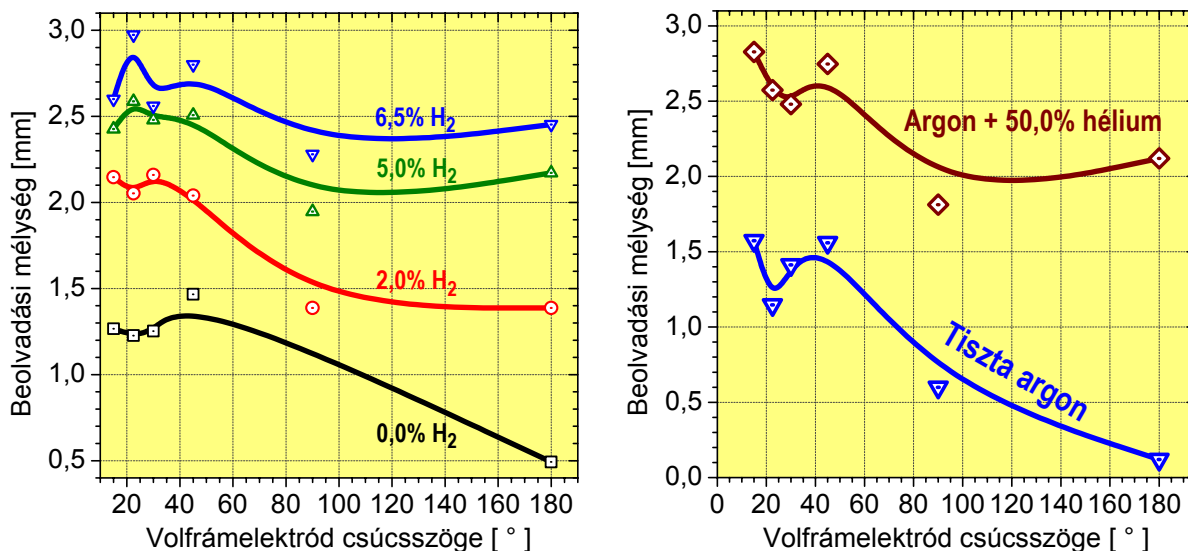
Varratszélességek a volfrám kúpszög és a védőgáz függvényében

A feszültség visszaesése a kisebb hővezető keresztmetszetre és az ív által érintett kúpfelület alkotóra merőleges irányú görbületének csökkenésére vezethető vissza. Nagyobb hőmérsékleten részben a termikus gerjesztés veszi át az elektromos térerő szerepét. A volfrámelektrod egyre nagyobb hőtágulása következtében az emittáló felületek közelebb tolódnak a munkadarabhoz – ezzel csökken az ívhossz. A görbület csökkenésével pedig nő a töltéshordozók felületi sűrűsége, és ezzel lokálisan a villamos térerő is. Így adott elektronáram fenntartására kisebb hegesztési feszültség is elegendő.

7.3. A beolvadási mélység

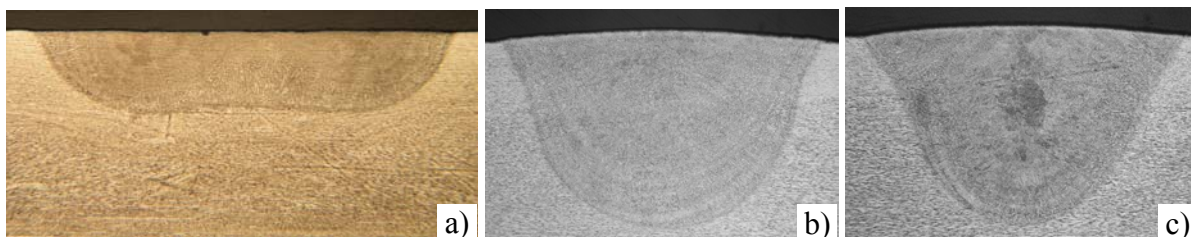
Tekintettel arra, hogy az összehasonlítás alapját képező gázszorozatok hegesztése azonos áramerősségen történt – a beolvadási mélységben tapasztalható változások kizárólag a kúpszög és a védőgáz hatásában kereshetők. A mélység alakításában elsődleges szerepe az alkalmazott védőgáz fajhőjének, hővezető- és hőátadó-képességének van. A metallográfiai csiszolatokon mért beolvadási mélység adatok összegzése látható a 10. ábrán a hidrogént és a héliumot tartalmazó gázokra.

Várható volt, hogy gázkeverékek esetén a beolvadási mélység jelentősen nőni fog. Látható, hogy a beolvadási mélység a 15°–45° tartományban a volfrám csúcscsögének növekedésével lényegesen nem változott. 45° felett azonban a beolvadási mélység meredeken esik. Argon, ill. hélium védőgáz alatt a varrat érezhetően ellaposodik: sok esetben mintha két párhuzamos varratvályúból állna össze (11.a ábra). A növekvő H₂-tartalom mellett ez az ellaposodás egyre kevésbé figyelhető meg (11.b-c ábra).



10. ábra

A beolvadási mélység a volfrámelektroda-kúpszög és a védőgáz függvényében



11. ábra

A varratprofil változása a védőgáz hatására: He / 90° (balra), Ar + 5% H₂ / 15° (középen), Ar + 5% H₂ / 180° (jobbra)

A jelenség a tapasztalható feszültségcsökkenéssel közvetlenül nem magyarázható, hiszen a beolvadási mélység látható módon 15°-nál (kisebb feszültség mellett) nem csökkent. Nagyobb áramerősségen jelentős eltérés tapasztalható a varrat formájában. A 22,5° és 30° közötti szögtartományban a beolvadás a varrat szimmetriatengelyében lényegesen mélyebb, mint közvetlenül mellette (lásd a 12. ábrát).



12. ábra

Varratprofilok 250 A áramerősséggel, argon védőgázzal hegsztve ($\alpha = 22,5^\circ$ és 30°)

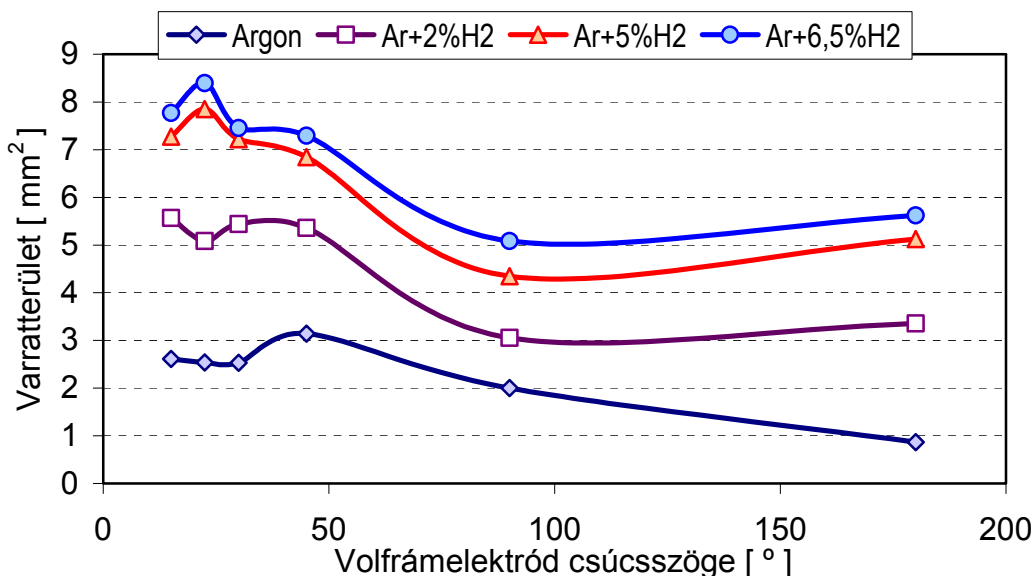
A 12. ábrán látható varratalak a kötés kialakítása szempontjából káros, növeli a melegrepedés kockázatát. A beolvadás mélysége a kúpszögeknél maximális, és nemcsak a nagyobb, hanem a kisebb szögek irányában is meredeken esik. Kis áramerősség-tartományokban a volf-rám csúcsgeometriájának varratmélységre kifejtett hatása a gyakorlatban nem mutatható ki.

7.4. Az ömledék keresztmetszetének területe

A megömlesztett terület nagysága szoros kapcsolatban van a már korábban vizsgált két paraméterrel: a beolvadási szélességgel és a beolvadási mélységgel. Ennek ellenére a két érték szorzata csak durva közelítést ad, hiszen a varratalakok jelentősen eltérnek egymástól.

A 13. ábrán jól megfigyelhető azonban az a tendencia, hogy a varrat terület 45° szögtartomány felett a beolvadási mélységnek köszönhetően erősen esni kezd. Mivel az itt felvett diagramok elsődlegesen a beolvadási mélységet bemutató 10. ábrával mutatnak hasonlóságot, joggal feltételezhetjük, hogy a megolvadt anyag térfogata elsődlegesen a varrat mélységétől függ.

Egyedül a 250 A hegesztőáram mellett lehegesztett próbára érvényes, hogy a terület maximuma jobbra, a 45°-os mérési ponthoz tolódik el. Ez érthető, hiszen éppen a 22,5° és 30° közötti szögtartományban tapasztaltuk a 12. ábrán bemutatott szűk beolvadási zónákat.



13. ábra

Varratterület a volfrámelektrod kúpszöge és a védőgáz H₂-tartalma függvényében

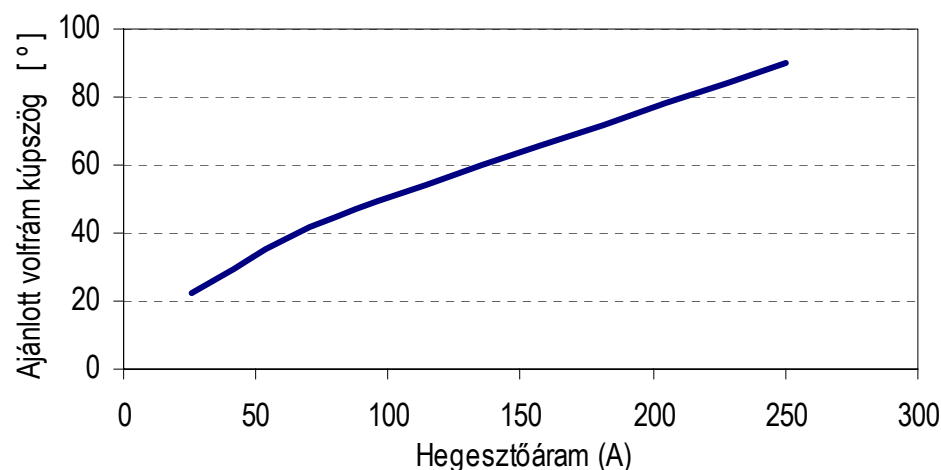
7.5. A varrat teljes geometriai tényezője

Tekintettel arra, hogy a kristályosodási repedés kockázatának felmérésekor, az alap- és hegesztőanyag összetételének vizsgálata után rögtön a varrat formája (geometriai tényezője) a legfontosabb paraméter, ezért jelentősége nem hanyagolható el. Mivel a hegesztés során hegesztőpálcát, huzalt nem használtunk, ezért a B szélességű és H teljes magasságú varrat geometriáját egy tényezővel, a ψ teljes geometriai tényezővel célszerű leírni:

$$\psi = \frac{B}{H} \quad (2)$$

Sem a túl nagy, sem a túl kicsi érték nem kedvező. Az előbbi kötőhegesztéskor kis hatékonyságot, magas varratközi hőmérsékletek mellett szemcsedurvulást, káros kiválásokat okoz. Az utóbbi jelentősen növeli a kristályosodási repedés kockázatát. A helyes varraténevező megállapításakor arra kell törekednünk, hogy adott anyag, technológia és szerkezeti kialakítás mellett a melegrepedés szempontjából még biztonságos, legkisebb értéket válasszuk ki. Ez felrakóhegesztésnél nem érvényes, ott a nagyobb értékek kedvezőek.

Az itt nem részletezett számítások eredményeként kapott adatok feldolgozásával arra a következtetésre jutottunk, hogy a kívánt minimális értékek argon esetében 26 A-en 22,5°-nál, 80 A-en 15° és 45 °-nál, 250 A-en 15° és 90 °-nál jelentkeztek. A közbenső értékek ezeknél nagyobbak. Ebből és a nagy áram okozta termikus terhelésből könnyen levezethető, milyen áramerősséghez milyen volfrám kúpszög a legideálisabb, és ezt az összesített eredményt mutatjuk be a 14. ábrán. Az optimális értéket túllépve, a varraténevező értéke erőteljesen romlik. Gázkeverékek esetében előny, hogy ez a jelenség alig érzékelhető.



14. ábra

Ajánlott volfrámelektrod-kúpszög az áramerősség függvényében (Ar védőgázra)

8. Összefoglalás

Az ipari gázokat előállító üzemeknek köszönhetően, a különböző védőgázok és gázkeverékek tulajdonságairól ma már meglehetősen sok adat áll a hegesztőmérnökök rendelkezésére. Hasonló a helyzet a volfrámelektrodák anyagait illetően is, hiszen ezen a területen is számos cég verseng a vevők kegyeiért. Az elektrodák csúcsgeometriájával, azok hatásának kutatásával azonban a szakma lényegesen kevesebbet foglalkozott. Ez ugyanis a közvetlen kereskedelmi tevékenységnek már nem tárgya.

Ismerjük-e vagy sem, a volfrámelektrod kúpszögének meghatározó szerepe van az ömledék alakjának kialakításában. Módosításával a beolvadás méretei tíz százaléktól több száz százalék tartományban változtathatók. A helyes paraméterek kiválasztásának eredménye

pedig már a költségekben és a szerkezet minőségében közvetlenül jelenik meg. Szükséges tehát, hogy a volfrámelektrod csúcsgeometriája is felkerüljön a tudatosan választott és optimalizált hegesztési paraméterek sorába. Az optimalizálás során az alábbi célfüggvények jöhetnek számításba:

- a varrat geometriai tényezője (belső vagy teljes) minimális értéke kötőhegesztésnél,
- a volfrámelektrod élettartalmának maximális értéke,
- az ív gyújtásának és újragyújthatóságának maximális biztonsága,
- a termelékenység maximális értéke.

A legkedvezőbb paraméterek azonban csak kompromisszumok árán választhatók ki, hiszen az elvárások sokszor egymásnak ellentmondóak. Az így kapott értékeknek pedig meg kell felelniük olyan külső tényezőknek is, melyeket az optimalizálás során csak mint külső peremfeltételeket tudunk figyelembe venni. (Pl. a kristályosodási repedés kockázata. További kutatási területet adhatnak a komplex csúcskialakítások, melyek adott esetben elegendő előnyt nyújthatnak ahhoz, hogy vizsgálatukkal érdemes legyen foglalkozni. Ehhez további igen sok munkára, kutatásra van szükség, és ez a dolgozat a tématerület jelentőségére igyekszik a figyelmet felhívni.

Hivatkozások jegyzéke

1. Baránszki-Jób Imre: Hegesztési kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
2. Bödök K: Az ötvözetlen, gyengén ötvözött és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága különös tekintettel azok hegeszthetőségére, Corweld Kft., Budapest, 1997.
3. Gáti J: Hegesztési zsebkönyv, Cokom Mérnökiroda Kft., Miskolc, 2003.
4. Szombatfalvy Á: A hőkezelés technológiája, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
5. Tisza M: Metallográfia, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2000.
6. Artinger I, Csikós G, Krállics Gy, Németh Á, Palotás B: Fémek és kerámiák technológiája, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997.
7. Gremsperger G, Marti Gy, Rejtő Z: Ívhegesztő áramforrások, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
8. Zalesszkij AM: A villamos ív, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
9. Kientzl I: A volfrámelektroda kopási folyamatának vizsgálata az AVI-hegesztésnél, TDK dolgozat, BME MTAT, Budapest, 2002.
10. <http://www.pro-fusiononline.com/feedback/fc-dec99.htm>
11. <http://www.hodwelding.hu/technologiak.html>
12. <http://www.peterlutz.ch/lernen/werkstoff/metalle/mmet3k.html>
13. <http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Lexikon/18Argon.htm>
14. http://vilib.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_20.htm
15. Hegesztési védőgázok, Linde Magyarország Rt.
16. Schutzgase zum Schweißen und Formieren von CrNi-Stählen, Linde Gas AG.
17. MAG-Schweißen korrosionbeständiger Stähle, AGA Gas GmbH & Co.
18. Schweißen verbindet. Schweiß- Schneid- und Schutzgase, PanGas AG.
19. EüM-SzCsM együttes rendelet a munkahelyek kémiai biztonságáról, 25/2000 (IX.30.)